

**KONTAMINASI LOGAM BERAT DI SEDIMEN: STUDI KASUS
PADA WADUK SAGULING, JAWA BARAT**
*(Heavy Metals Contamination in Sediment:
Saguling Reservoir Case Study West Java, Indonesia)*

Yoyok Sudarso, Gunawan P. Yoga, dan Tri Suryono
Puslit Limnologi-LIPI, Jl. Jakarta-Bogor Km 46,
16911, Cibinong, Kab. Bogor, e-mail: ysudarso@plasa.com

Abstrak

Waduk Saguling merupakan salah satu waduk *cascade* yang berlokasi di Jawa Barat, yang sekarang ini mengalami beberapa permasalahan antara lain: proses sedimentasi yang tinggi, korositas turbin, penurunan kualitas air akibat *blooming* alga, polusi organik, pestisida, dan logam-logam berat yang berasal dari buangan limbah domestik, industri, aktivitas gunung berapi, dan sebagainya. Logam berat di ekosistem akuatik mempunyai kecenderungan untuk berikatan dengan sedimen yang mampu bertindak sebagai sumber polusi sekunder ke kolom air. Penelitian pada tahun 2004 ini bertujuan untuk mengungkap kontaminasi logam berat Cu, Cd, dan Pb pada sedimen Waduk Saguling. Sampling dilakukan tiga kali mulai bulan Juni hingga September 2004 dengan 13 titik stasiun pengamatan. Hasil kontaminasi logam berat pada sedimen di setiap stasiun pengamatan menunjukkan adanya perbedaan yang sangat signifikan diantara masing-masing stasiun pengamatan yaitu: untuk logam Cd ($F=17,803$ dan $p=0,00001$), Pb ($F=154,343$ dan $p<0,01$), dan Cu ($F=36,499$, $P<0,000001$). Konsentrasi logam berat hasil pengamatan dibandingkan dengan *guideline* dari kementerian lingkungan Ontario, SEPA, ERL, ERM, PEL, SEL, dan TEL, secara umum menunjukkan bahwa kontaminasi logam Pb dan Cu yang paling berpotensi menimbulkan gangguan pada ekosistem perairan, sedangkan logam Cd masih dibawah ambang batas dari *guideline* tersebut diatas. Khusus untuk *guideline* yang berasal dari US-EPA region V *Great lakes* ke tiga logam tersebut diatas sudah masuk dalam kategori terpolusi berat dari St. Gunung Wayang hingga Stasiun Rajamandala.

Kata kunci: logam berat, sedimen, kontaminasi, Waduk Saguling, *guideline*.

Abstract

Saguling reservoir is one of the three cascade reservoirs, which is located in West Java. Nowadays, the reservoir has some serious problems such as: high sedimentation rate, turbine corrosivity, water quality depletion caused by blooming algae, organic pollution, pesticide, and heavy metals which are resulted from domestic and industrial wastes, as well as leaching from volcano activity. Heavy metals bound to particulate matters are major component of sediment that in turn can be a secondary pollution source. This research was conducted in the year of 2004, and the aims was to reveal heavy metals contamination in Saguling reservoir' sediment. Samples were taken three times at 13 sampling sites during June to September 2004. Results of heavy metal contamination in sediment of Saguling reservoir show significant differences among sampling

sites. The Fisher test values for each heavy metals were Cd ($F=17,803$ and $p = 0,00001$), Pb ($F = 154,343$ and $p < 0,01$), and Cu ($F = 35,499$ and $p = < 0,000001$). Heavy metals content in sediment were then compared to some guidelines such as SEPA, Ontario Environment Ministry, ERL, ERM, PEL, SEL and PEL. It seemed that Pb and Cu contamination in sediment were at risk to disturb aquatic ecosystem, while Cd was still below threshold of those guidelines. However, according to USEPA region V Great Lakes, all heavy metals contamination in sediment were beyond the threshold.

Key words: heavy metals, sediment, contamination, Saguling reservoir, guidelines

PENDAHULUAN

Waduk Saguling merupakan salah satu waduk *cascade* yang berlokasi di provinsi Jawa Barat. Sebagian besar *inlet* Waduk Saguling berasal dari S. Citarum yang mengalir dari Gunung Wayang melalui kota Bandung dan berakhir di Teluk Jakarta sebagai hilirnya. Sekarang ini Waduk Saguling mengalami permasalahan antara lain: peningkatan beban sedimen yang tinggi (> 4 juta m^3/thn), masuknya sampah dan gulma air ke waduk ($250.000 m^3/thn$), percepatan korositas turbin, dan penurunan kualitas air oleh kontaminasi bahan organik, logam berat, pestisida dan bahan mikropolutan lainnya yang berasal dari limbah domestik, industri, dan lahan pertanian (Anonymus 2004). Di sisi lain sumber kontaminasi logam berat dan bahan polutan lainnya juga ditengarai berasal dari proses pelindihan aktivitas gunung berapi seperti: G. Tangkuban Perahu dan Patuha yang mampu membawa kandungan senyawa sulfat ke DAS Citarum sebesar 6000-12.000 ppm, Chlorida 5300-12.600 ppm, dan logam berat antara lain: As, Ba, Mg, Al, Cu, Pb, Zn, Hg, Se, dan Cd. (Sriwana 1999). Adanya fenomena kematian ikan secara mendadak yang mencapai ribuan ton, sementara ini diduga berasal dari proses *upwelling* dari berbagai macam polutan yang mengendap dari dasar sedimen yang kemudian dilepaskan ke kolom air (Brahmana dan Firdaus 1997).

Ketersediaan ion logam berat bebas pada lingkungan akuatik mempunyai kecenderungan

untuk berikatan dengan bahan partikulat, senyawa *acid volatile sulphide* (AVS), besi, mangan oksihidroksida, dan bahan organik lainnya (Chapman *et.al* 1998). Kemampuan bahan partikulat untuk mengikat unsur logam relatif sangat tinggi, sehingga konsentrasi logam dalam bahan partikulat bisa mencapai 1000 hingga 100.000 kali lipat dibandingkan dengan konsentrasi di dalam air (Förtstner 1983). Pengendapan bahan partikulat tersuspensi merupakan penyusun terbesar dari terbentuknya sedimen yang berfungsi sebagai kompartemen dan berpotensi sebagai sumber polusi sekunder pada kolom air. Tingginya konsentrasi logam pada sedimen belum tentu menunjukkan gejala toksisitas maupun bioakumulasi pada biota air, jika ion yang bersifat *bioavailable* terbatas (Power dan Chapman 1992). Fraksi logam yang bersifat *bioavailable* biasanya dalam bentuk kation divalen misalnya Me^{2+} , $Me(H_2O)_x^{2+}$ (Chapman *et al.* 1998), atau $Me(OH)^+$ (Allen 1993). Pada kondisi normal kation logam tersebut mungkin berikatan membentuk senyawa kompleks yang bersifat kurang *bioavailable*. Kondisi demikian diibaratkan oleh Calmano *et al.* (1997) sebagai “ bom waktu” karena adanya sedikit faktor pemicu seperti perubahan potensial redoks, pH, biodegradasi bahan organik, maupun faktor lingkungan lainnya menyebabkan ion logam yang bersifat toksik dilepaskan ke dalam kolom air. Fenomena ini dapat diketahui dari konsentrasi beberapa logam berat yang terakumulasi pada ikan budidaya jaring apung

yang sudah melewati ambang batas kelayakan untuk dikonsumsi manusia (Sudarso *et al*, 2001). Oleh sebab itu diperlukan tindakan pemantauan maupun remediasi pada sedimen yang dinyatakan toksik sebelum dampak negatif yang lebih besar terjadi.

Penelitian tentang kontaminasi logam berat di sedimen Waduk Saguling, umumnya masih bersifat parsial dan belum banyak dikaji. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat kontaminasi logam berat pada sedimen dari Waduk Saguling. Jenis logam berat yang akan dikaji pada penelitian dibatasi hanya tiga logam yaitu: kadmium (Cd), timah hitam (Pb), dan tembaga (Cu) yang sering direkomendasikan oleh *United States Environment Protect Agency* (US-EPA) dan berpotensi toksik bagi sebagian besar biota akuatik dan manusia.

METODOLOGI

Penelitian ini dilaksanakan di Waduk Saguling dengan mengambil lokasi titik samplingnya pada sentra-sentra perikanan jaring apung dan kesamaan lokasi titik sampling yang telah ditetapkan sebelumnya oleh P.T. Indonesia Power dalam kegiatan pemantauan kualitas air setiap triwulannya. Kesamaan lokasi titik sampling ini dimaksudkan untuk melengkapi data kualitas air hasil pemantauan PT. Indonesia Power guna pengelolaan kualitas air waduk.

Ada 13 Stasiun yang diteliti tingkat kontaminasi logam beratnya antara lain: **St 1.** Hulu S. Citarum di Gunung Wayang, **St 2.** S. Citarum di Nanjung, **St 3.** S. Citarum *Trash Boom* Batujajar, **St 4.** Cihaur Kampung Cipendeuy, **St 5.** Cangkorah, **St 6.** Cimerang, **St 7.** Muara Cihaur/ Kampung Maroko, **St 8.** Muara Cipatik, **St 9.** Muara Ciminyak, **St 10.** Muara Cijere, **St 11.** Muara Cijambu, **St 12.** Dekat *intake structure*, dan **St 13.** Rajamandala. Lokasi sampling yang berada di Gunung Wayang berfungsi sebagai *background*/ latar belakang konsentrasi logam pada sedimen sebelum masuk ke S. Citarum dan Waduk Saguling. Pada **Gambar 1.** merupakan peta lokasi titik sampling dari Waduk Saguling yang akan dikaji pada penelitian ini.

Sampling sedimen telah dilakukan pada bulan Juni hingga September 2004 dengan menggunakan alat berupa *Ekman grab sampler*. Pengambilan cuplikan sedimen hanya dilakukan pada bagian lapisan atas/ permukaan (± 5 cm) yang nantinya akan diproses untuk analisis kimia lebih lanjut. Pada masing-masing stasiun pengamatan dilakukan pengulangan sebanyak 3 kali pengambilan. Cuplikan sedimen tersebut kemudian dimasukkan dalam botol kaca *Scott* yang bervolume 250 ml. Botol tersebut dimasukkan dalam *coolbox* dan es batu sebagai pengawetnya. Parameter kimia logam berat dari sedimen yang dianalisis di Puslit Limnologi-LIPI antara lain: Cu, Cd, dan Pb dan

Tabel 1: Ringkasan Metodologi yang Dipergunakan untuk Analisis Kimia pada Sedimen dan Aair.

No	Parameter	Jenis Sampel	Metode	Alat Ukur
1	pH	sedimen	Ekstraksi dengan H ₂ O dan KCL 10%	pH meter
2	Logam berat (Pb, Cd, dan Cu)	Sedimen	Ekstraksi kering (<i>dry digest</i>)	AAS <i>Graphite furnace</i>
3	C- organik	Sedimen	Kolorimeter	Spektrofotometer

parameter pendukungnya seperti: total karbon organik pada sedimen, distribusi partikel, dan pH sedimen. **Tabel 1.** merupakan ringkasan dari prosedur analisis kimia pendukung yang dilakukan pada sedimen dan air. Penjelasan lebih rinci tentang prosedur analisis logam berat dan parameter pendukungnya dapat dilihat dalam *standard methods* APPHA (1995), Graham (1948), Bray and Kurtz (1945), Blackmore *et al.* (1981), dan Alloway (1998).

Analisis data.

Prediksi kemungkinan konsentrasi logam berat dalam menimbulkan gangguan pada biota akuatik mengacu pada beberapa *guideline* yang disadur dari publikasi Burton (2002), Giezy and Hoke (1990), dan Anonymous (1991) seperti yang tercantum pada **Tabel 2.** Data hasil analisis logam berat pada sedimen dan air pada setiap stasiun pengamatan diuji statistik dengan menggunakan *analysis of variancel*/ANOVA satu arah ($\alpha = 0,05$). Pengujian analisis statistik tersebut dilakukan dengan menggunakan software MINITAB versi 14 (*Minitab Inc.*).

Tahap rangking kontaminasi logam berat di setiap stasiun pengamatan didasarkan pada adopsi sistem *scoring* dalam penyusunan indek multimetrik (Barbour *et al.* 1999). Data kontaminasi logam berat pada sedimen dari setiap stasiun pengamatan diurutkan dari mulai yang terkecil hingga yang terbesar, setelah itu dilakukan tahap penentuan *percentile* dari 5%, 25%, 50%, dan 75%. Data yang terletak dari *percentile* 0% sampai 5% diberi score 1, *percentile* 5% - 25 score 3, 25% - 50% score 5, 50% - 75% score 7 dan > 75% diberi score 9. Hal ini berlaku untuk masing-masing logam berat (Cu, Cd, dan Pb). Hasil penjumlahan dari ketiga *score* tersebut digunakan untuk rangking tingkat kontaminasi logam berat total pada sedimen.

HASIL

Konsentrasi logam berat yang terakumulasi pada sedimen dari bulan Juni hingga September 2004 telah disajikan dalam gambar grafik *Whisker Box and Plot* (**Gambar 2, 3, dan 4**) dan parameter pendukungnya dalam **Tabel 3.** Pada gambar tersebut menunjukkan kontaminasi logam berat pada S. Citarum sudah terjadi dari mulai bagian hulu (St. Gunung Wayang) hingga *outlet* Waduk Saguling (St. Rajamandala) dengan pengkayaan logam berat yang relatif tinggi. Konsentrasi logam setelah St. Gunung Wayang menunjukkan peningkatan secara gradual dari 3 hingga 8 kali lipat untuk beberapa jenis parameter logam berat yang diamati. Berdasarkan 3 *guidelines* tentang baku mutu logam berat pada sedimen yang dikeluarkan oleh US-EPA *Region V*, Kementrian lingkungan Ontario Canada, dan Swedia (SEPA) menunjukkan adanya perbedaan kriteria dari ketiga baku mutu tersebut. Dari baku mutu US-EPA *region V* menunjukkan semua konsentrasi logam berat yang terakumulasi pada sedimen mulai St. Gunung Wayang hingga St. Rajamandala sudah masuk dalam kategori terpolusi berat. Sedangkan dari kedua *guideline* terakhir yaitu: Kementrian Lingkungan Ontario dan Swedia (SEPA) menunjukkan konsentrasi logam Cd masih dalam ketegori yang menunjukkan tidak ada pengaruh pada biota akuatik dan konsentrasi yang sangat rendah. Konsentrasi logam Pb dalam kategori tingkat yang menunjukkan tidak ada pengaruh (*guideline* Ontario) sampai konsentrasi rendah (SEPA), sedangkan logam Cu sudah masuk dalam kategori level yang menunjukkan pengaruh terendah sampai konsentrasi yang tinggi (SEPA) yang umumnya terjadi pada bagian *inlet* dan stasiun lainnya yang berada di dalam Waduk.



Gambar 1: Peta Lokasi Titik Sampling Pengambilan Sedimen pada Waduk Saguling.

Dari lima *guidelines sediment effect concentration* (SEC) yaitu: ERL (*effect range low*), ERM (*effect range median*), TEL (*threshold effect level*), PEL (*probable effect level*), dan SEL (*severe effect level*) menunjukkan hanya logam Cu yang sudah melebihi ketiga *guidelines* tersebut diatas (TEL, ERL, dan SEL) dari Stasiun Gunung Wayang hingga Rajamandala, dan untuk logam berat Pb hanya di Stasiun Nanjung saja yang telah melebihi ketiga nilai *guideline* diatas.

Hasil uji ANOVA tentang kontaminasi logam berat Cd (**Gambar 2**), Pb (**Gambar 3**), dan Cu (**Gambar 4**) pada sedimen di setiap stasiun pengamatan menunjukkan adanya perbedaan yang sangat signifikan ($p < 0,01$). Konsentrasi logam Cd pada sedimen seperti yang tampak pada **Gambar 3**, menunjukkan kontaminasi logam tersebut dari St. Gunung

Wayang mengalami peningkatan secara *gradual* hingga Stasiun *Intake Structure* dan berbeda nyata antara stasiun yang satu dengan lainnya ($F = 17,803$ dan $p = 0,00001$). Setelah St. *intake structure* yaitu St. Rajamandala konsentrasi logam Cd mulai menunjukkan penurunan kembali hingga konsentrasinya relatif sama dengan St. Gunung Wayang (0,07mg/kg). Stasiun Nanjung (0,263 mg/kg) dan Muara Cipatik (0,227 mg/kg) menunjukkan kontaminasi logam Cd paling besar diantara semua stasiun pengamatan. Setelah St. Nanjung mulai menunjukkan adanya penurunan yang drastis dan akan meningkat kembali sampai pada Muara Cipatik. Kontaminasi logam Cd setelah St. Muara Cipatik juga menunjukkan adanya kecenderungan menurun dan meningkat lagi pada St. Cijere (0,11 mg/kg) dan *Intake structure* (0,11 mg/kg).

Tabel 2: Daftar Beberapa *Guideline* Kualitas Logam Berat pada Sedimen dari Beberapa Negara.

Asal <i>Guideline</i>	Konsentrasi rata-rata logam berat total pada sedimen (mg/kg berat kering)			Kriteria
	Cd	Pb	Cu	
Standard USEPA region V ^a	-	<0,04	<0,025	Belum terpolusi
	-	0,04-0,06	0,025-0,05	Terpolusi sedang
	> 0,006	> 0,06	> 0,05	Terpolusi berat
Kementrian Lingkungan Ontario Canada ^a	0,6	23	15	Tidak ada pengaruh
	1	31	25	menunjukkan Pengaruh terendah
	10	250	114	Ambang batas dari kisaran toleransi
SEPA ^c	? 0,2	? 5	? 10	Konsentrasi sangat rendah
	0,2-0,7	5 - 30	10-25	Konsentrasi Rendah
	0,7 - 2	30 -100	25-50	Konsentrasi sedang
	2 - 5	100-400	50-100	Konsentrasi tinggi
	> 5	> 400	>150	Konsentrasi sangat tinggi
ERL ^b	5	35	70	-
ERM ^b	9	110	390	-
TEL ^b	0,6	35	35,7	-
PEL ^b	3,53	91,3	197	-
SEL ^b	10	250	86	-

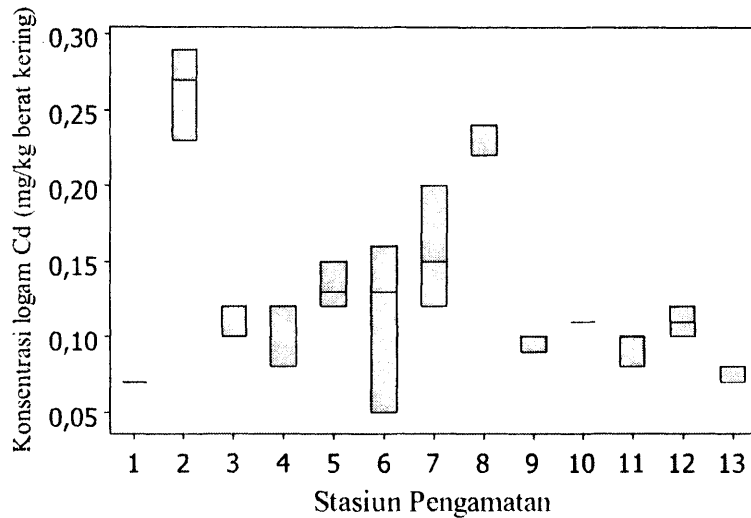
Keterangan:

^a *Guidelines* untuk mengklasifikasikan sedimen dari *Great lakes* dan perairan secara umum di Ontario Canada (Giesy and Hoke 1990),

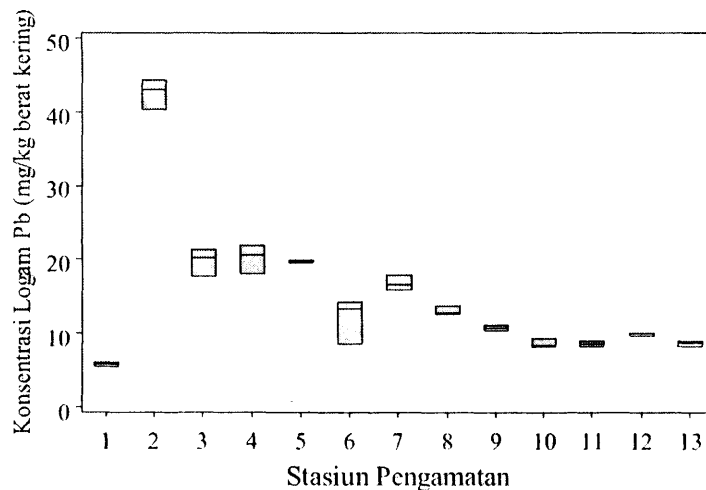
^b *Sediment Quality Guidelines* (SQG) untuk logam berat (Burton 2002),

* nilai konsentrasi diatas dari TEL atau ERL dan SEL. NA merupakan singkatan dari *not aplicable*,

^c *Swedish Environmental Protection Agency (SEPA)*



Gambar 2. Kontaminasi Logam Cd pada Sedimen (mg/kg berat kering) di masing-masing Stasiun Pengamatan. Garis didalam Grafik *Whisker & Plot* Menunjukkan Nilai Tengah/ Median.



Gambar 3. Kontaminasi Logam Pb pada Sedimen (mg/kg Berat Kering) di Masing-masing Stasiun Pengamatan. Garis Didalam Grafik *Whisker & Plot* Menunjukkan Nilai Tengah/Median

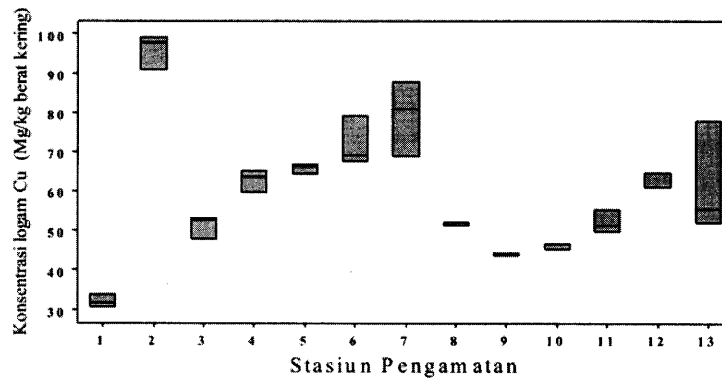
Kontaminasi logam Pb pada sedimen yang dimulai dari St. Gunung Wayang menunjukkan adanya peningkatan yang cukup bervariasi dari 2 hingga 8 kali lipat (**Gambar 3.**). Konsentrasi logam Pb setelah St. Nanjung (5,733 mg/kg) berangsur-angsur mulai menunjukkan penurunan dari St. *Trashboom* Batujajar (19,79 mg/kg) hingga St. Rajamandala (8,2mg/kg).

Hasil uji statistik dengan menggunakan ANOVA, konsentrasi logam berat Pb pada sedimen menunjukkan adanya perbedaan yang sangat signifikan ($F = 154,343$ dan $p < 0,01$) diantara stasiun pengamatan.

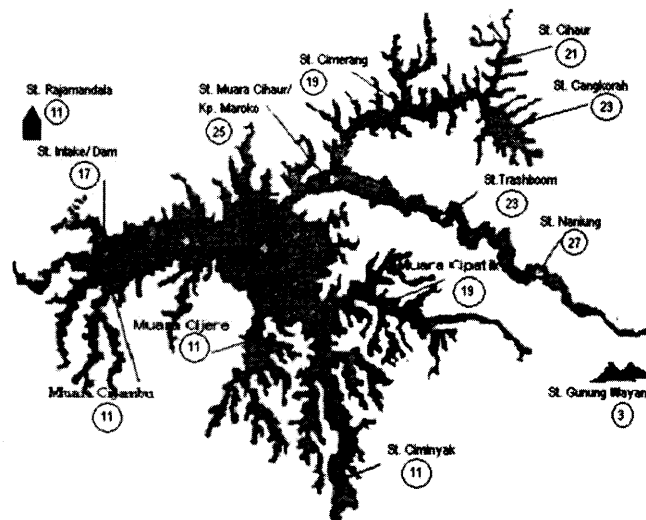
Kontaminasi logam Cu pada sedimen dapat dilihat pada **Gambar 4.** Dari gambar tersebut menunjukkan akumulasi logam berat

Cu pada sedimen relatif tinggi dari mulai St. Nanjung (95,97 mg/kg) hingga St. Rajamandala (55,5 mg/kg) dibandingkan dengan St. Gunung Wayang (31, 97mg/kg) yang berfungsi sebagai latar belakang konsentrasi. Peningkatan kontaminasi logam Cu setelah St. Gunung Wayang sangat bervariasi dari 2 hingga 4 kali lipat. Stasiun Nanjung konsentrasi logam Cu paling tinggi yang kemudian menurun pada St. Batujajar (51,30 mg/kg). Konsentrasi logam Cu setelah

St. Batujajar berangsur-angsur meningkat kembali hingga St. muara Cihaur (79,27 mg/kg). Setelah stasiun Muara Cihaur konsentrasi logam Cu-nya cenderung menurun sampai St. Muara Ciminyak (43,97 mg/kg), dan meningkat kembali hingga St. Rajamandala (55,5 mg/kg). Hasil uji statistik dengan ANOVA, menunjukkan adanya perbedaan yang sangat signifikan logam berat Cu yang terakumulasi pada sedimen di setiap stasiun pengamatan ($F = 36,499$, $P < 0,000001$).



Gambar 4. Kontaminasi Logam Cu pada Sedimen (mg/kg Berat Kering) di Masing-masing Stasiun Pengamatan. Garis Didalam Grafik *Whisker & Plot* Menunjukkan Nilai Tengah/Median



Gambar 5. Tahap Rangka dari Besarnya Kontaminasi Logam Total di Setiap Stasiun Pengamatan. Semakin Tinggi Nilai Rangka Menunjukkan Tingginya Kontaminasi.

Tabel 3: Hasil Analisis Karbon Organik dan Fraksi Butiran dari Sedimen di Setiap Stasiun Pengamatan.

No	Lokasi	Karbon Organik [%]	pH dasar	Fraksi Butiran Sedimen Dalam Satuan %					
				Clay & Silt	Pasir				
					Sangat Halus	Halus	Sedang	Kasar	Sangat Kasar
				<63 μm	63 – 125 μm	125 – 250 μm	250 – 500 μm	500 μm – 1mm	1 – 2mm
1	Gunung Wayang	0.820	7.278	4.63	37.16	40.00	11.31	6.91	-
2	Nanjung	4.547	6.594	38.50	28.24	20.65	12.20	0.41	-
3	Batuajar	1.087	6.598	19.37	22.04	34.01	22.85	1.73	-
4	Cihaur	1.833	8.52	19.07	22.12	35.03	21.89	1.89	-
5	Cangkorah	2.147	9.116	19.07	22.12	35.03	21.89	1.89	-
6	Cimerang	1.187	8.304	18.58	24.30	31.03	24.02	2.08	-
7	Maroko	2.61	7.78	6.58	32.83	35.86	23.11	1.63	-
8	Cipatik	3.19	7.48	16.94	30.56	29.26	22.10	1.14	-
9	Ciminyak	2.2	7.62	4.47	27.07	43.54	23.91	1.01	-
10	Cijere	2.40	8.268	23.37	34.23	32.17	9.96	0.28	-
11	Cijambu	1.487	7.776	4.08	31.19	39.16	24.17	1.40	-
12	Intake	1.47	7.74	16.58	28.14	25.01	26.57	3.71	-
13	Rajamandala	0.983	7.43	24.79	69.94	4.03	1.08	0.16	-

Hasil normalisasi konsentrasi logam berat Cu, Cd, dan Pb pada sedimen yang digunakan untuk *rangking* tempat seperti yang disajikan dalam Gambar 5. Dari gambar tersebut menunjukkan secara umum stasiun yang mempunyai nilai *rangking* tempat terkecil (3) merupakan daerah yang sedikit mengalami gangguan dari aktivitas antropogenik (*background* konsentrasi). Daerah yang mempunyai nilai *rangking* diatas 18 (St. Nanjung, Trashboom, Cangkorah, Cihaur, Cimerang, dan Muara Cipatik) merupakan daerah yang paling tinggi mendapat pengkayaan logam berat dari aktivitas antropogenik. Sedangkan daerah yang mempunyai nilai *rangking* dibawah

18 (St. Ciminyak, Cijere, Muara Cijambu, *Intake*, dan Rajamandala) menunjukkan stasiun yang mengalami pengkayaan logam berat dengan kontaminasi sedang. Dari Gambar 5. juga menunjukkan pola penurunan konsentrasi logam berat total (Cu, Cd, Pb) yang terakumulasi pada sedimen dari mulai St. Nanjung hingga Rajamandala. Kondisi ini mengindikasikan mekanisme proses pembersihan diri (*self purification*) dari kontaminasi logam berat masih terjadi di dalam Waduk Saguling. Semakin kearah kiri dari peta waduk (*intake/ DAM*), maka cenderung terjadi penurunan nilai *rangking* dari konsentrasi logam berat totalnya.

PEMBAHASAN

Negara Amerika dan Kanada telah mengembangkan *guideline* yang lazim dikenal sebagai *sediment effect concentration* (SECs) antara lain: ERL dan ERM (Long *et al.* 1995), TEL, PEL, dan SEL (MacDonald *et al.* 1996; Smith *et al.* 1996) yang didasarkan pada basis data keberadaan konsentrasi logam yang secara empiris menimbulkan gangguan/ efek merugikan pada biota air di lapangan maupun di laboratorium (Burton 2002). Dari basis data tersebut, nilai ERL ditetapkan pada *percentile* ke 10, sedangkan nilai ERM dari *percentile* ke 50. Nilai ERL mengindikasikan konsentrasi dibawah efek yang merugikan jarang terjadi, sedangkan nilai ERM mengindikasikan konsentrasi diatas dari efek merugikan yang sering terjadi. Probabilitas munculnya insiden pengaruh yang merugikan berkisar antara 20-30% ketika konsentrasi logam berat di sedimen melebihi nilai ERL, sedangkan 60-90% ketika melebihi nilai ERM (Anonymous, 1999). TEL dan PEL hampir mirip dengan ERL dan ERM, akan tetapi kedua *guidelines* tersebut lebih banyak digunakan dan dikembangkan di daerah Florida USA. Proses penetapan nilai TEL dan PEL lebih rinci dapat dilihat pada Ingersoll *et al.* (1996). Stasiun yang mempunyai konsentrasi logam Cu (St.Nanjung hingga Rajamandala) dan Pb (St. Nanjung) diatas dari *guideline* EPA, Ontario, SEPA, SEL, ERL dan TEL menunjukkan logam berat di stasiun tersebut berpotensi untuk bersifat *bioavailable* ke perairan dan menimbulkan gangguan pada biota perairan. Konsentrasi logam Cd walaupun konsentrasinya relatif kecil dilapangan dan sebagian besar masih dibawah ambang batas *guidelines*, namun keberadaan logam tersebut harus tetap diwaspadai.

Sumber kontaminasi logam berat yang masuk ke S.Citarum sangat beragam dan kompleks untuk dipisahkan satu persatu. Peningkatan konsentrasi logam di St. Gunung Wayang hingga St. Rajamandala secara garis besar berasal dari 2 sumber menurut asal proses

pembentukannya seperti yang diungkapkan oleh Förstner (1983) yaitu: proses pelapukan batuan (*lithogenic*) dan aktivitas antropogenik. Whittman (1983) lebih lanjut membagi empat proses yang mampu meningkatkan konsentrasi logam berat ke perairan yaitu: 1). Proses pelapukan dari batuan dasar penyusun partikel sedimen, 2). Aktivitas proses industri dan rumah tangga yang melibatkan penggunaan unsur logam berat, 3). Proses *leaching* dari penumpukan sampah atau penimbunan limbah padat, dan 4). Hasil ekskresi dari hewan dan tanaman yang mengandung logam berat.

Hasil penelitian yang dilakukan oleh Sriwana (1999) mengindikasikan adanya peningkatan logam berat di S. Citarum juga disebabkan oleh proses *leaching* aktivitas letusan gunung berapi seperti G. Patuha dan Tangkuban Perahu yang masuk ke anak sungai DAS Citarum hulu. Peningkatan logam berat akibat proses pelapukan batuan juga telah dikaji oleh Colbourne *et al.* (1975) yang menunjukkan peningkatan konsentrasi logam arsen (As) dan tembaga (Cu) di area Dartmoor *South-West England* berkorelasi secara signifikan dengan pengkayaan elemen tersebut dari tanah yang dihasilkan dari proses pelapukan batuan *meta-morphic aureole* yang terjadi dari sebuah intrusi granit. Adanya proses *leaching* dari pelapukan batuan dasar pada ketiga gunung tersebut diatas (G. Wayang, Patuha, dan Tangkuban Perahu) memungkinkan akan meningkatkan kandungan mineral-mineral logam berat ke perairan S. Citarum yang akhirnya masuk ke *inlet* Waduk Saguling. Disamping pengaruh diatas, kecenderungan terjadinya hujan asam di beberapa lokasi di kota Bandung yang mencapai pH 3-4 sangat berpotensi meningkatkan kelarutan konsentrasi logam-logam berat penyusun mineral tanah atau sumber-sumber logam lainnya ke perairan S. Citarum (Otto Soemarwoto, Lembaga Ekologi Universitas Padjajaran, Bandung, *pers. Com*)

Peningkatan konsentrasi logam berat di S.Citarum sebagian besar disebabkan oleh pengaruh aktivitas antropogenik yang terjadi

disekitar DAS Citarum hulu berupa buangan limbah industri maupun domestik yang tanpa melalui proses pengolahan limbah yang memadai. Menurut Mulyaningrum (2004) dalam Salim (2004) menyebutkan persentase jenis limbah dominan selain limbah industri yang masuk ke S. Citarum adalah limbah domestik yang mencapai 70,94%, pertanian 17,51%, peternakan 3,16%, dan rumah sakit 0.04%. Sebagian besar logam berat banyak digunakan oleh industri-industri tekstil sebagai bahan baku pewarna kain dan industri lainnya yang banyak berdiri di sekitar S. Citarum. Diperkirakan ± 361 industri yang berdiri di sekitar DAS Citarum hulu berpotensi menimbulkan pencemaran logam berat dan bahan organik lainnya ke perairan (Anonymus 2004b). Tujuh kawasan daerah industri yang dilalui oleh S. Citarum hulu yang diduga berpotensi menimbulkan pencemaran logam berat ke Waduk Saguling meliputi: daerah Majalaya, Banjaran, Rancaekek, Deyeuhkolot, Ujungberung, Cimahi, dan Padalarang (Rachmatyah, 2003). Salim (2004) menambahkan, beban pencemar logam berat yang masuk ke S. Citarum juga berasal dari limbah industri yang masuk ke S. Cikapundung dan Cisangkuy yang kedua anak sungai tersebut akan bergabung dengan S. Citarum. Dari foto citra satelit (Anonymus 2002) menunjukkan adanya penambahan kawasan industri baru yang terletak di DAS Citarum hulu dalam jangka waktu Th. 1994 hingga 2001. Hal ini menunjukkan adanya peningkatan lebih dari dua kali lipat jumlah industri yang terletak di daerah: Dayeuhkolot, Cipadung Kulon, Majalaya, Cipacing dan Kecamatan Cikancung yang berpotensi meningkatkan pencemaran ke S. Citarum. Disamping limbah industri dan rumah tangga sebagai unsur pencemar dominan yang masuk ke S. Citarum, di beberapa lokasi Kab. Bandung juga ditengarai mulai terdapat aktivitas penambangan emas seperti di daerah Soreang dan Pengalengan yang dampak negatif dari aktivitas penambangan tersebut biasanya berupa peningkatan konsentrasi logam berat

merkuri dan mineral-mineral lainnya ke perairan.

Peningkatan konsentrasi logam di sedimen juga dihasilkan dari kontaminasi jalur atmosferik yang berasal dari kejadian alami seperti: letusan gunung berapi dan aktivitas antropogenik yang terjadi disekitar kota Bandung maupun berasal dari luar kota Bandung. Adanya hujan akan membawa bahan partikulat turun kembali ke bumi dan dapat dengan mudah masuk ke sungai. Whittman (1983) telah merinci 10 macam logam berat yang dihasilkan dari emisi pembakaran dari bahan bakar fosil meliputi: kobalt (Co), khromium (Cr), tembaga (Cu), nikel (Ni), merkuri (Hg), kadmium (Cd), selenium (Se), arsen (As), seng (Zn), dan timah hitam (Pb). Logam Pb biasanya sengaja ditambahkan ke dalam bahan bakar bensin guna meningkatkan nilai oktannya pada mesin kendaraan bermotor. Studi kasus yang dilakukan oleh Shiomi (1973) dalam Whittman (1983) di Danau Ontario Canada menunjukkan pengkayaan logam Pb dapat berkisar antara 15-36% yang berasal dari presipitasi atmosferik yang masuk ke Sungai Niagara. Di Negara-negara maju dan negara sedang berkembang seperti Indonesia, penggunaan logam berat Pb dalam bensin premium merupakan salah satu sumber bahan pencemar dominan dari polusi udara. Studi yang dilakukan oleh Nriagu (1978) dalam Odum (2000) menunjukkan konsentrasi logam Pb yang berasal dari debu jalanan dapat mencapai 100 - 67.800 ppm, sedangkan dari aliran permukaan berkisar antara 100 - 12.000 ppb.

Dari penelitian yang dilakukan di Waduk Saguling ini nampaknya ada kecenderungan jenis logam berat yang berikatan dengan sedimen mengikuti pola *hierarchi* sebagai berikut $Cu > Pb > Cd$. Logam berat Cu konsentrasinya paling tinggi dan dominan untuk terakumulasi pada sedimen, diikuti oleh logam Pb dan Cd. Tingginya logam Cu di sedimen kemungkinan besar disebabkan oleh adanya pengkayaan logam berat tersebut oleh: 1). Aktivitas antropogenik seperti seringnya penggunaan logam berat Cu dalam bahan baku

pewarna tekstil, industri elektrik, penggunaan pupuk pertanian, fungisida, dan sebagainya (Whittman 1983). 2). Logam berat tembaga (Cu) termasuk dalam jenis logam esensial yang dibutuhkan oleh hampir semua makhluk hidup termasuk tumbuhan dan hewan guna mengatur proses metabolisme dalam tubuh terutama yang berhubungan dengan proses enzimatis (Whittman 1983). Keberadaan logam tersebut di tanah biasanya merupakan unsur logam normal penyusun dari mineral-mineral tanah. Pengkayaan logam tersebut di tanah secara alami dapat disebabkan oleh proses dekomposisi dari tanaman dan hewan yang telah mati. Karena sebagian besar lokasi sumber mata air di G. Wayang termasuk dalam kawasan hutan, maka pengkayaan unsur mineral logam Cu ke perairan dapat berasal dari proses dekomposisi jatuhnya dari daun maupun ranting kayu yang berfungsi sebagai sumber *allochthonous* ke perairan S. Citarum. Peningkatan logam Pb setelah Cu mungkin lebih banyak disebabkan oleh tingginya penggunaan logam Pb tersebut sebagai bahan aditif dalam bahan bakar bensin premium maupun industri elektronik. Rendahnya logam Cd mungkin juga berkaitan dengan terbatasnya penggunaan logam tersebut dalam aktivitas antropogenik, karena adanya pertimbangan khusus dari sisi aspek kesehatan pada manusia maupun pada makhluk hidup lainnya. Disamping itu faktor lainnya yang harus diperhatikan dalam memberikan pengaruh pada selektivitas afinitas logam berat untuk berikatan dengan partikel *clay* di sedimen misalnya: sifat fisik dan kimia perairan, valensi dari ion logam, perilaku *hy-dration*, elektronegatifitas, dan potensi ionisasi dari setiap logam yang masih belum dapat dipahami secara sempurna (Förstner 1983b).

Adanya perbedaan tingkat signifikansi konsentrasi setiap logam berat (Cd, Cu, dan Pb) pada sedimen di setiap stasiun pengamatan kemungkinan besar disebabkan oleh pengaruh beban pencemar yang masuk ke perairan pada masing-masing stasiun pengamatan. Förstner (1983) menyebutkan kecenderungan

peningkatan konsentrasi logam berat pada sedimen lebih banyak disebabkan oleh besarnya tingkat kontaminasi yang terjadi pada tempat-tempat tersebut, karena sedimen mampu merespon dan merekam kejadian polusi yang terjadi di dalam ekosistem akuatik. Sebagai contoh: St. Cihaur, Cangkorah, dan Cimerang merupakan kawasan padat industri yang berada di dekat/ pinggir waduk yang seringkali membuang limbahnya secara langsung ke dalam Waduk (Misdi, PT. Indonesia Power, Bandung, *pers. com.*). Hal ini akan berpotensi meningkatkan konsentrasi logam pada stasiun tersebut. St. Nanjung dan Trashboom terjadi peningkatan konsentrasi logam berat, karena pada stasiun ini terdapat masukan beban pencemar secara langsung dari S. Citarum yang telah melalui Kota Bandung. Hasil analisis karbon organik dan distribusi partikel pada St. Nanjung (tabel 3) mendukung peningkatan logam berat pada Stasiun tersebut karena mempunyai konsentrasi karbon organik (4,547 %) dan % fraksi butiran halus *silt* dan *clay* tertinggi (38,50%) dibandingkan dengan stasiun lainnya. Salomons and Forstner (1984) dan Hornberger *et al.* (1997) menyebutkan distribusi ukuran partikel dalam sampel sedimen dapat mempengaruhi konsentrasi logam. Fraksi butiran halus terutama *clay* dan *silt* mempunyai kemampuan yang lebih tinggi berikatan dengan logam berat dibandingkan dengan fraksi butir pasir karena luasnya area permukaan dan relatif tingginya gaya elektrostatis dari permukaan partikel tersebut. Disamping itu, partikel halus juga mempunyai kemampuan untuk menjebak matrix dari perifiton dan alga filamen yang memungkinkan berhubungan secara langsung dengan tingginya konsentrasi logam pada fauna bentik makroavertebrata. Förstner (1983) juga menyebutkan peningkatan konsentrasi logam berat dapat pula terjadi pada besar ukuran butir $> 63 \frac{1}{4} \mu m$ yang sangat ditentukan oleh tingginya konsentrasi mineral logam berat yang terdapat dalam bahan detritus, sedangkan konsentrasi logam berat pada ukuran butir $< 2 \frac{1}{4} \mu m$ dapat lebih rendah karena

terjadi penurunan potensial adsorpsi dari substansi *crystalline* atau *amorphous* sebagai penyusun sedimen. Tingginya karbon organik pada sedimen juga berpotensi akan meningkatkan kapasitas ikatan antara logam berat dengan bahan organik. Kontaminasi logam berat di St. Ciminyak dan stasiun lainnya mungkin berasal dari anak-anak sungai yang mengalir ke dalam waduk maupun dari kontaminasi logam dari air Waduk Saguling sendiri.

Penurunan konsentrasi logam pada sedimen mungkin juga berhubungan dengan perlambatan arus air sungai yang membawa bahan partikulat yang masuk dari St. Trashboom hingga ke *Intake*. Proses pengendapan bahan partikulat yang terjadi di sepanjang arus sungai utama akan berdampak pada penurunan logam yang terakumulasi pada sedimen. Fenomena diatas juga dapat dilihat dari penurunan logam dari mulai St. Nanjung hingga St. Trashboom yang kemungkinan disebabkan oleh banyaknya bahan partikulat yang telah mengendap sebelumnya disepanjang jalur sungai antara St. Nanjung hingga *Trashboom*. St. Muara Cihaur/ Kp. Maroko nilai rangkingnya masih relatif tinggi dibandingkan dengan St. Trashboom yang kemungkinan besar disebabkan oleh penambahan beban kontaminasi logam yang berasal dari St. *Trashboom* maupun dari St. Cihaur, Cangkorah, dan St. Cimerang. Masih tingginya nilai rangking dari St. Muara Cipatik kemungkinan besar disebabkan oleh masuknya beban pencemar logam yang berasal dari Sungai Cipatik. Adapun untuk St. Ciminyak, Cijere, Muara Cijambu, *Intake* dan Rajamandala cenderung menunjukkan penurunan logam berat yang kemungkinan disebabkan oleh minimnya beban pencemar logam yang terjadi pada anak sungai-anak sungai di lokasi tersebut. Dari gambar 5 juga menunjukkan kegunaan rangking tempat untuk mengetahui besarnya kontaminasi dari keseluruhan logam berat pada masing-masing stasiun pengamatan guna prioritas tempat yang akan dilakukan remediasi oleh pihak PT. Indonesia Power.

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, ada beberapa hal yang dapat disimpulkan antara lain: kontaminasi logam pada sedimen menunjukkan adanya beda nyata yang sangat signifikan diantara masing-masing stasiun pengamatan Cd ($F = 17,803$ dan $p = 0,00001$), Pb ($F = 154,343$ dan $p < 0,01$), dan Cu ($F = 36,499$, $P < 0,000001$). Konsentrasi logam berat pada sedimen dibandingkan dengan *guide-line* dari US-EPA, kementerian lingkungan Ontario, SEPA, ERL, ERM, PEL, SEL, dan TEL, secara umum menunjukkan kontaminasi logam Pb dan Cu yang paling berpotensi menimbulkan gangguan pada ekosistem perairan, sedangkan Cd masih dibawah ambang batas dari sebagian besar guideline tersebut diatas. Walaupun beberapa logam berat yang terakumulasi pada sedimen masih dibawah ambang batas dari beberapa guideline, akan tetapi dampak negatif dari keberadaan logam tersebut pada ekosistem perairan harus tetap diwaspadai. Rangking tempat sangat berguna khususnya untuk pengelolaan waduk dari kontaminasi logam yang terakumulasi di sedimen.

DAFTAR PUSTAKA

- Allen H.E., 1993, The Significance Of Trace Metal Speciation For Water, Sediment, And Soil Quality Criteria And Standards, *The Sci. Of Tot. Environ. Supple.* 12: 23-45pp.
- Alloway B.J., 1998, Heavy Metal in Soils, Second Edition, Blackie Academic & Profesional, London
- Anonim, 2004, Booklet Indonesia Power unit Bisnis Pembangkitan Saguling.
- Anonymus, 2004b, Menkimbangiwil Serahkan Instalasi Pengolahan Air Limbah Senilai Rp. 27,48 Milyar, <http://www.pu.go.id/humas/mei/kbw2404005.htm>

- Anonymus, 2002, Pemantauan Daerah Pengaliran Sungai Citarum, Berita Inderaja 1 (1): 1-2 hal.
- Anonymus, 1991, Quality Criteria for lakes and watercourses, A system for Classification of water Chemistry and Sediment, and organism metal concentration, the Swedish Environmental Protection Agency (SEPA), Sweden, 36 pp.
- Anonymus, 1999, Sediment Quality Guidelines Developed for The National Status and Trends Programs, NOAA, 12pp.
- APHA, 1995, Standard Methods. For Examination of Water and Wastewater, By M.C.Rand: A.E. Greenberg and M.J. Taras (Eds). 19 Th Edition, APPA-AWWA/ WEFW, USA, 1193pp.
- Barbour M.T., J. Gerritsen, B.D. Synder, and J.B. Stribling. 1999. Rapid Bioassessment Protocols For Use In Stream and Wadeable River: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates, and Fish. EPA 841-B-99-002. 200pp.
- Blackmore L.C., P.L. Searle, and B.K. Daly, 1981, Methods for Chemicals Analysis of Soils, N.Z. Soil Bureau Sci. Rep. 10 A, Soil Bureau, Sower Hutt, New-zealand.
- Brahmana S.S., dan A. Firdaus, 1997, Eutrophication In Three Reservoirs At Citarum River, Its Relation to Beneficial Uses, Proceeding Workshop On Ecosystem Approach To Lake And Reservoir Management, 199-211pp.
- Bray R.H., and L.T. Kurtz, 1945, Determination of Total Organic and Available Form of Phosphorus in Soil, Soil Sci 59: 39-45pp
- Burton Jr A., 2002, sediment Quality Criteria in Use Around The World, *limnology* 3: 65-75pp
- Calmano W., W. Ahlf, U. Fostner, 1997, Sediment Quality Assessment: Chemical And Biological Approach. 1-35pp.
- Chapman P.M., 1996, Presentation And Interpretation Of Sediment Quality Triad Data, *Ecotoxicology* 5: 327-339pp.
- Chapman P.M., F. Wang, C. Janssen, G. Per-soone, H.E. Allen, 1998, Ecotoxicology Of Metals In Aquatic Sediments: Binding And Release, Bioavailability, Risk Assessment, And Remediation, *Can. J. Fish Aquat. Sci.* 55: 2221-2243pp.
- Colbourne P., B.J. Alloway, I. Thornton, 1975, Arsenic and Heavy Metal in Soils associated with regional Geochemicals anaomalies in Southwest England, *Sci.Total Environ.* 4: 359-363pp
- Förtstner U., 1983, Chapter D: Metal pollution assessment from Sediment Analysis, in Metal Pollution In Aquatic Environment, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, Germany, 110-196pp
- Förtstner U., 1983b, Chapter E: Metal Transfer Between Solids and Aqueous Phases, in Metal Pollution In Aquatic Environment, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, Germany, 197-269pp.
- Giesy J.P. and R. A. Hoke, 1990, Freshwater sediment Quality Criteria: Toxicity Bioassessment: Chapter 9, in R. Baudo, J.P. Giesy, H. Muntau: Sediments: Chemistry and Toxicity of In-Place pollutants, Lewis Publishers. Inc, Ann Arbor Boca Raton Boston, Michigan, 265-348pp.
- Graham, E.R. 1948, Determination of Soil Organic matter by means a Photoelectric Colorimeter, *Soil Sci.* 65 : 181-187pp
- Hornberger M.L., J.H. Lambing, S.N. Luoma, E.V. Axtmann, 1997, Spatial and Temporal Trends of Trece Metals in Surface Water, Bed Sediment, and biota of The Upper Clark Fork Basin, Montana, 1985-95, USGS, Open File Report 97-669, Menlo Park, California, 127pp.
- Ingersoll C.G., P.S. Haverland, E.L. Brunson, T.J. Canfield, F.J. Dwyer, C.E. Henke, N.E. Kimble, D.R. Mount, R.G. Fox, 1996, Calculation and Evaluation of Sediment Effect Concentration for The Amphiphod *Hyaella azteca* and the Midges *Chironomus riparius*, *J. Great Lakes Res.* 22(3): 602-623pp.

- Long E.R., P.M. Chapman, 1985, A Sediment Quality Triad: Measures Of Sediment Contamination, Toxicity, And Infaunal Community Composition In Pudget Sound, *Mar. Pollut. Bull* 16: 405-415pp.
- Long E.R., D.D. MacDonald, S.L. Smith, and F.D. Calder, 1995, Incidence of Adverse Biological Effects Within Ranges of Chemical Concentrations in Marine and Estuarine Sediment, *Environmental Management* 19(1):81-97pp.
- Mac Donald D.D., R.S. Carr, F.D. Calder, E.R. Long, and C.G. Ingersoll, 1996, Development and Evaluation of Sediment Quality Guidelines for Florida Coastal Water, *Ecotoxicology* 5:253-278pp.
- Odum H.T., W. Wojcik, L.Pritchard, S.Ton, J.D. Delfino, M.Wojcik, S.Leszcznski. J.D. Patel, S.D. Doherty, J. Stasik, 2000, Background of Published Studies on Lead and Wetland, in Heavy Metals in the Environment Using Wetland for their Removal, Lewis Publishers, USA, 29-48pp
- Power E.A., Dan P.M. Chapman, 1992, Assessing Sediment Quality, In : A. Burton (Eds), *Sediment Toxicity Assessment*, Lewis Publishers, 1-16pp.
- Rachmatyah I, 2003, Waduk Saguling dan Cirata Tercemar Logam Berat, *http://www.kompas.com/kompas-cetak/0306/12/iptek/365759.htm*
- Reynoldson T.B., J.C. Metcalfe-Smith, 1992, An Overview Of The Assessment Of Aquatic Ecosystem Health Using Benthic Invertebrates, *Journal Of Aquatic Ecosystem Health* 1: 295-308pp
- Salim H., 2004, Cegah Kasus Buyat Terjadi di Citarum, *http://www.pikiran-rakyat.com/cetak/0704/28/0102.htm*
- Salomons, W., U. Forstner, 1984, *Metals in The Hydrocycle*, Springer-Verlag, 349pp.
- Smith S.L., D.D. mac Donald, K.A. Kennleyside, C.G. Ingersoll, and J. Field, 1996, A Preliminary Evaluation of Sediment Quality Assessment Values for Freshwater Ecosystems, *J. Great Lakes Res.* 22:624-638pp.
- Sriwana T., 1999, Polusi Vulkanogenik: Akumulasi Unsur Kimia Dan Penyebarannya Di Sekitar Kawah Putih, G. Patuha Bandung, Makalah Seminar Di Puslit Limnologi-LIPI, Cibinong, 5pp.
- Sudarso Y., F. Mustofa, M. Badjoeri, S. Aisyah, 2001, Logam Berat Pada Ikan Budidaya Jaring Apung Di Waduk Saguling, Unpublished, 12pp.
- Whittman G. T. W. , 1983, Chapter B, Toxic Metal, in : U. Förstner and G.T.W. Whittman: *Metal Pollution in The Aquatic Environment*, Springer-Verlag, Germany, 3-68pp.